

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.12.020

地震工况下自动扶梯桁架结构分析研究^{*}

杨天玲¹, 林 森³, 陈义东²

(1. 浙江机电职业技术学院 智能制造学院, 浙江 杭州 310053;

2. 中国联合工程有限公司, 浙江 杭州 310052; 3. 杭州领学科创教育科技有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要:针对自动扶梯在地震工况时受力分析这一问题,以合同案例为对象,应用有限元分析方法,对自动扶梯在地震工况下桁架结构强度做了分析计算研究,对不同地震加速度时桁架加强方案和土建处理方式进行了全面总结。首先,对比了不同国家地震标准载荷工况的区别,利用静力学分析和有限元简化方法,在基础结构分析的基础上,增加了地震载荷的分析;其次,采用 ANSYS 参数化设计语言编程方式,将不同方向载荷同时加载到自动扶梯桁架上,得到了不同地震加速度时桁架的型材规格;最后,在桁架结构确定后,对土建处理方案做了进一步分析,描述了头部固定和中间支撑固定的不同方式,对土建延伸量做了阐述和总结。研究结果表明:地震工况时,应用有限元分析方法,计算得到了不同地震加速度时桁架加强方案,可满足强度及稳定性标准要求,为此类结构地震工况分析及处理提供了一种可参考的解决方式。

关键词:运输机械;桁架结构强度;自动扶梯;ANSYS 参数化设计语言;静力学分析;地震载荷

中图分类号:TH236

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2022)12-1784-05

Analysis of escalator truss structure under seismic conditions

YANG Tian-ling¹, LIN Sen³, CHEN Yi-dong²

(1. Institute of Intelligent Manufacturing, Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering,

Hangzhou 310053, China; 2. China United Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310052, China;

3. Hangzhou LiveLab Education Technology Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: Aiming at the problem of stress analysis of escalator under the seismic load, taking the example of contract case as an instruction, the strength of escalator truss structure under seismic load was analyzed and summarized by finite element analysis method, and the truss reinforcement and civil engineering treatment method under seismic condition were comprehensively and deeply understood. Firstly, the differences of seismic load cases in different standard were compared. Using static analysis and finite element simplification method, the seismic load was added on the basis of basic structure analysis. Then, using ANSYS parametric design language (APDL), the profile specifications of truss with different seismic accelerations were obtained by calculation and analysis. Finally, after the improvement structure was determined, the civil engineering treatment methods were further analyzed and summarized. The endpoint fixation and intermediate support fixation were described. The civil engineering extension was calculated and summarized. The research results show that, the finite element analysis method was practical when it was applied to the seismic condition of escalator truss. The reinforcement escalator truss was calculated and summarized under different seismic acceleration, and the strength and stability of truss can meet the standard requirements. This research method provided a practical solution for this kind of structure under the seismic condition.

Key words: transport machinery; truss structure strength; escalator; ANSYS parametric design language (APDL); static analysis; seismic load

0 引 言

自动扶梯的现有设计或抗震设计是否可以抵抗地

震灾害,是否可以达到小震不坏、大震不倒的基本要求,现有抗震设计标准是否需要完善,都是非常值得持续研究的课题,对行业的发展也是非常有意义的。

收稿日期:2022-05-18

基金项目:中华职业教育社第一届黄炎培职业教育思想研究规划课题资助项目(ZJS2022YB171);浙江省人力资源和社会保障科学课题研究课题资助项目(2022083)

作者简介:杨天玲(1979-),女,甘肃靖远人,硕士,主要从事机械设计与智能制造方面的研究及教学工作。Email:544535450@qq.com

自动扶梯的金属桁架是整个扶梯最重要的支撑结构,在任何工况载荷下都应该保持良好的承重状态,才能满足自动扶梯的使用。全球各地自动扶梯实际使用工况中,抗震要求是非常常见的。

GB16899-2011 标准^[1]中对自动扶梯在地震工况下结构强度没有做相应要求。EN115-1:2017^[2]附录 M 描述了抗震设计要求和自动扶梯金属桁架简要计算流程,但对实际工作指导性不强。

GB50011-2010 中对自动扶梯桁架的抗震设计提出以下目标^[3]:(1)小震不坏,桁架结构未受损或不需修理继续可以使用;(2)中震可修,桁架结构略损坏,经一般修理或不修理仍可使用;(3)大震不倒,遭遇罕见地震时,桁架结构不倒塌或发生严重破坏。

EN 1998-1:2004+A1:2013^[4]提供了水平和垂直方向地震设计反应谱曲线,地震需求合同可按照高地震活动区地震加速度 4.8m/s^2 进行设计。

GB18306-2015《中国地震动参数区划图》^[5]给出了中国地震动参数区划图技术要素、基本规定和地震动参数确定方法,适用于一般建设工程的抗震设防。

GB50017-2017^[6]33-58、DIN18800-T1^[7]、DIN18800-T2^[8]标准中对类似钢结构计算给出了经验性的理论计算方法,但未涉及地震工况。

ASME A17.1^[9]中对按照加速度范围对地震级别进行了划分,并对地震保护装置做了要求,但没有涉及实际案例。

李骏^[10]采用等效静力法和时程分析方法分析了北京顺义西站自动扶梯不会发生永久变形,符合抗震要求,但仅是针对个例。

王智超^[11]研究了地震工况下,滑动端土建搭接量设置为 2 倍层间相对水平位移,保证有足够的冗余量。周绪红^[12]提出了水平地震作用下交错桁架钢框架结构抗震设计方法,达到了结构“强腹杆弱弦杆”和“大震不倒”的抗震设计目标。刘冬梅^[13]梳理了自动扶梯抗震技术发展路线,对由于地震产生的 3 种变形,即纵向移位、横向移位以及上下振动、挠曲进行了详细阐述。KONO K^[14]研究了大地震中自动扶梯的响应特性。LI X P^[15]对考虑位移和应力约束的非平稳随机地震激励下桁架结构进行了拓扑优化。以上学者对自动扶梯地震工况下结构设计方法及响应特性进行了分析,但大多数的研究是理论性的分析,对不同地震加速度情况下桁架方案没有进行系统研究。在地震工况下,土建如何处理也未提及。为了满足企业实际需求,迫切需要对以上问题进行系统分析。

针对自动扶梯桁架在地震工况下所受载荷特征,

笔者利用 ANSYS 参数化设计语言(以下简称 APDL 语言)建模、约束、施加其他载荷和地震载荷,求解最大挠度和各种不同工况下的最大应力,校核各种工况下整体及受压杆件的稳定性,对其薄弱部位进行优化设计,使其满足使用要求;同时,对地震工况下,土建如何处理进行详细阐述。

1 地震理论基础

自动扶梯依托自身桁架横跨建筑物的不同楼层,大多数情况下,不考虑地震载荷的影响。但局部区域,越来越多的合同有地震要求,需要将地震载荷也考虑其中。

当地震发生时,从地震震源产生的纵波和横波向地球表面传播^[16],再经过建筑物将这些随机的地震能量传递到扶梯上,由此,自动扶梯上所有构件都将承载地震载荷。其中,作为自动扶梯承力构件的桁架起到最为重要的作用,分析自动扶梯抗震性能也就是对桁架进行地震载荷工况的分析,确保桁架结构拥有足够的抗震性能,保证大震不倒,自动扶梯不会从建筑物支撑位置坠落。

全球各地对自动扶梯地震设计略有不同,笔者对应用比较广泛的两种标准采用的计算方法进行对比。

ASME 17.1 标准对钢结构地震载荷公式,以及 EN 1998-1 标准对建筑钢结构地震载荷公式如下:

$$1.2 \times dw + 0.25 \times P + PGA \times (1.2 \times dw^H + 0.25 \times P^H) \quad (1)$$

$$1.0 \times dw + 0.4 \times P + PGA \times (1.0 \times dw^H + 0.4 \times P^H) \quad (2)$$

式中: dw —自动扶梯自重, N; P —乘客载荷, $5\,000\text{ N/m}^2$; PGA —地震加速度, g —重力加速度, $g = 9.8\text{ m/s}^2$; dw^H —横向自动扶梯自重, N; P^H —横向乘客载荷, $5\,000\text{ N/m}^2$ 。

2 自动扶梯结构

2.1 自动扶梯桁架构造

钢结构桁架是承载自动扶梯所有载荷的部件,桁架杆件之间使用焊接方式,采用 BEAM189 单元模拟梁单元之间位移、剪切、扭转,以此计算桁架结构的受力情况。

对常规载荷的计算,文献[17]中已做了详细说明。笔者重点研究地震载荷时桁架加强方案,并对土建的处理方式做分析阐述。

2.2 地震载荷约束

无地震载荷时,自动扶梯桁架与建筑物土建支撑位置仅是搭接关系,也就是桁架放置在土建支撑位置,相当于竖直方向位移为 0。对于考虑地震载荷时,桁架在建筑物中的约束与无地震载荷时不同。因为考虑到横向和纵向地震波的影响,不是将桁架搭在建筑物土建支撑点,而是必须将桁架的一个支撑点固定在建筑物上。

地震工况下,无支撑桁架上头部固定约束,下头部滑动支撑,约束简图如图 1 所示。

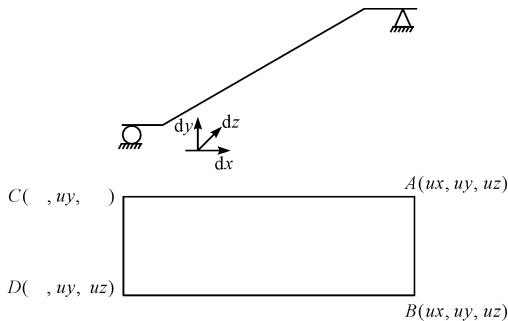


图 1 无支撑桁架地震工况约束简图

2.3 载荷工况

自动扶梯桁架无地震工况的载荷都是竖直方向,与重力方向相同。地震工况下,不仅有竖直方向载荷,还增加了地震波横向的载荷,也就是图 1 中 dz 方向。

组合工况及其用途如表 1 所示。

表 1 组合工况及其用途

序号	载荷工况组合	用途
组合工况 1	$1.0 \times P$	计算桁架挠度
组合工况 2	$1.35 \times dw + 1.5 \times (P + DM)$	计算桁架应力
组合工况 3	$1.2 \times dw + 0.25 \times P + PGA \times (1.2 \times dw^H + 0.25 \times P^H)$	ASME 标准, 计算应力
组合工况 4	$1.0 \times dw + 0.4 \times P + PGA \times (1.0 \times dw^H + 0.4 \times P^H)$	EN 标准, 计算应力

其中:DM—动态载荷,N;其他参数同公式(1,2)。

采用 APDL 语言编写程序,增加地震组合工况。例如地震工况约束:

```
.....
DK,N3,UX,0,,0,UY,UZ
DK,N3+OFFSNUM,UX,0,,0,UY,UZ
DK,1,UY,0,,0
DK,1+OFFSNUM,UY,0,,0,UZ
.....
部分地震波横向加载程序:
.....
* DO,J,1,NL0-1
* GET,LENG_PR,LINE,J,LENG
* GET,LENG_BK,LINE,J+1,LENG
* SET,SP1,(LENG_PR+LENG_BK)*(STEP+

```

```
TRACK)/4000
* DO,I,0,1
FK,201+I*OFFSNUM+J,FY,-SP1
FK,201+I*OFFSNUM+J,FZ,-SP1
* ENDDO
* ENDDO
.....
组合工况加载程序:
.....
LCASE,1
LCOPER,ADD,2
LCOPER,ADD,3
LCOPER,ADD,4
LCOPER,ADD,5
LCOPER,ADD,6
LCOPER,ADD,7
LCWRITE,10
.....
```

2.4 模拟计算结果

一台自动扶梯基本参数:提升高度 $H=5\,300\text{ mm}$,水平跨距 $DBE=15\,000\text{ mm}$,倾斜角度 30° ,无中间支撑,地震加速度 $PGA=0.05\text{ g}$ 。桁架所用材料为 Q235B,材料许用应力 $\sigma_s=235\text{ MPa}^{[18]}$ 。

基本参数示意图如图 2 所示。

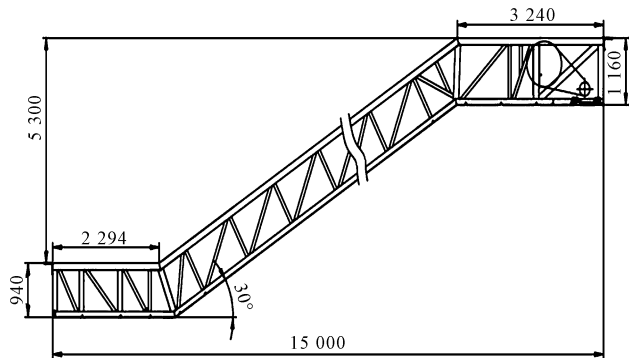


图 2 基本参数示意图

根据组合工况,桁架挠度与应力都是正常工况计算,组合工况 1 计算桁架挠度,组合工况 2 计算桁架应力,组合工况 3、4 是地震载荷不同标准下应力情况。

首先,每种工况计算得到最大应力要小于材料许用应力;

其次,在各种工况下,受压应力的上弦杆必须要验算其稳定性。

构件受压、扭转屈曲状态时,根据如下公式进行验算^{[6]35}:

$$\frac{N}{Af} + \frac{M_x}{r_x M_{plx}} + \frac{M_y}{r_y M_{ply}} \leq 1.0 \quad (3)$$

式中: N —最大轴向力,kN; A —材料截面积, mm^2 ; f —材料许用抗弯强度, N/mm^2 ; M_x, M_y — x, y 向弯矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$; r_x, r_y —截面塑性发展系数,封闭截面取 1.05;

M_{plx}, M_{ply} —材料绕 x 轴、 y 轴许用弯矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

笔者采用 ANSYS 软件 APDL 语言编程计算得到各种工况下应力、轴向力、两个方向弯矩后,对其稳定性进行核算。

当 $PGA = 0.05 \text{ g}$ 时,计算得到各组合工况的数值如表 2 所示。

表 2 组合工况应力

序号	应力/ MPa	上弦杆 轴向力/ kN	M_x / ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	M_y / ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	稳定 性
组合工况 1	106.3	131.6	0.51	0.33	符合
组合工况 2	160.5	197.4	0.76	0.49	符合
组合工况 3	123.46	138.18	1.58	1.02	符合
组合工况 4	128.4	134.23	1.49	0.96	符合

从表 2 可以看出:各种组合工况都可以满足材料许用应力要求,即计算得到的应力小于材料许用应力 σ_s 。组合工况 2 轴向力最大,力矩较小;地震组合工况 3、4 因为地震横向载荷的影响弯矩变大,但稳定性也满足要求。

对此例 $PGA = 0.05 \text{ g}$ 的桁架,几种组合工况应力和稳定性都满足需求。

2.5 地震 PGA 取值范围

《中国地震动参数区划图》中地震峰值加速度与烈度对照表,局部地区地震加速度会考虑到 0.5 g ,因此对不同地震加速度进行了模拟计算。

对自动扶梯单跨跨度小于 15 m 的情况,笔者对主要承力杆件规格进行优化设计,得出不同地震加速度时自动扶梯桁架型材的加强方案,如表 3 所示。

表 3 不同地震加速度 (PGA) 时桁架型材规格

PGA /g	上弦杆 (方管)	下弦杆 (方管)	斜、竖杆 (方管)	横梁 (槽钢)	底板 (钢板) /mm
0 ~ 0.24	120 × 60 × 4	100 × 60 × 4	60 × 3	U6.3	3
0.24 ~ 0.32	120 × 60 × 5	100 × 60 × 5	60 × 4	U6.3	3
0.32 ~ 0.5	120 × 60 × 6	100 × 60 × 6	60 × 4	U6.3	3

从表 3 可以看出:对自动扶梯单跨跨度小于 15 m 的情况: $PGA < 0.24 \text{ g}$ 时桁架型材规格不变;当 $PGA > 0.24 \text{ g}$ 时,桁架型材进行了加强,这样才能满足受压杆件稳定的要求。

当遇到客户定义的地震加速度正好是 0.24 g 时,建议桁架方案选择 $PGA > 0.24 \text{ g}$ 的方案。

3 土建处理方案

3.1 头部固定方案

地震工况时,建筑物自身需要根据抗震烈度要求按

照建筑标准进行加强设计。依附于建筑物上的自动扶梯需要满足的基本要求是:大震不倒、小震不坏,必须在自动扶梯和建筑物接口的处理上严格保证达到该要求。

自动扶梯需要将一端固定在建筑土建上,土建深度和预埋件都需要建筑设计之初双方沟通确认并落实到施工图纸上。头部固定方案是将支反力较大的上头部与建筑物做固定处理,其他支撑常规滑动处理。

头部支撑固定处理方式如图 3 所示。

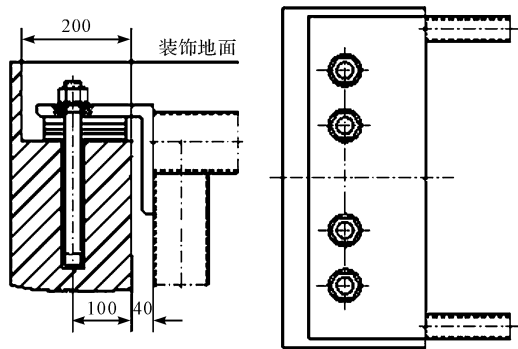


图 3 头部固定处理方式示意图

3.2 中间支撑固定方案

对于有中间支撑的自动扶梯,固定中间支撑位置也是比较好的选择,土建施工时比头部固定更容易实现,但对建筑空间会有一定影响,这需要建筑设计时综合考虑,将必须的土建预埋零件设置好。采用中间支撑固定方案时,其他支撑按常规处理。

中间支撑固定处理方式如图 4 所示。

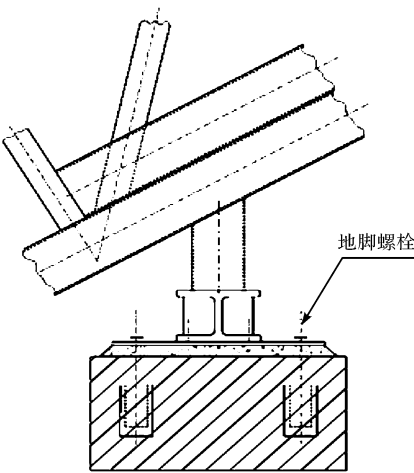


图 4 中间支撑固定处理方式示意图

3.3 土建延伸处理

地震发生时,建筑物下方的地基发生摇晃,建筑跟着前后、左右摇晃。要使架设在建筑中的自动扶梯不掉下来,除了头部固定方案或中间支撑固定方案外,在其他支撑位置处桁架必须有相应的延伸量。也就是自动扶梯桁架和土建要设置一定的延伸量,这些自由滑

动空间让自动扶梯能够释放地震波带来的移动,从而不会从建筑支撑处掉落。

对自动扶梯单跨跨度小于 15 m 的情况,桁架和土建延伸量设置如表 4 所示。

表 4 不同提升高度桁架和土建延伸量设置

提升高度 H/mm	土建总延伸 尺寸 x/mm	桁架头部滑 动尺寸 $(x/2)/\text{mm}$
$\leq 4\,500$	150	75
$> 4\,500$	300	150

桁架延伸处理时,考虑到端部大角钢的强度问题,建议上弦杆做延伸,延伸量与大角钢延伸量一致。

桁架和土建延伸处理示意图如图 5 所示。

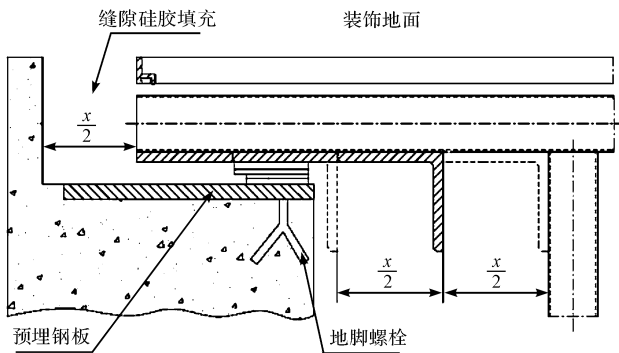


图 5 桁架和土建延伸处理示意图

4 结束语

笔者采用 ANSYS 软件,在常规工况强度分析的基础上,采用有限元方法重点对地震载荷工况进行了分析,针对土建处理做了详细阐述。

研究表明:

(1) 地震加速度 PGA 在 $0 \sim 0.5\text{ g}$ 时,根据计算结果不断调整桁架型材规格,得出合适的桁架加强方案;

(2) 地震工况时,要保证自动扶梯不会从支撑处掉落,必须有一个支撑点是固定在土建上,桁架头部滑动支撑处和土建也都要做相应的延伸处理。笔者对头部支撑固定和中间支撑的固定方式做了描述,对不同提升高度桁架和土建延伸量设置提出了参考量值,具有实际借鉴意义。

在下一阶段,笔者将继续深入研究自动扶梯桁架结构安全问题,考虑多中间支撑桁架、大跨度无支撑桁架结构如何加强并优化,将实际生产中遇到的非标问

题逐步标准化,以提高生产效率,降低成本。

参考文献 (References):

[1] 国家标准化工作委员会. GB 16899 - 2011 中国标准书号 [S]. 北京:中国标准出版社,2011.

[2] CEN national std. EN115-1:2017 Safety of Escalator and Moving Walks-Part 1: Construction and Installation [S]. Vienna: European Standards Committee,2008.

[3] 国家标准化工作委员会. GB 50011-2010 中国标准书号 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[4] CEN national std. EN 1998-1:2004 + A1:2013Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake- Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings [S]. Vienna: European Standards Committee,2013.

[5] 国家标准化工作委员会. GB 18306 - 2015 中国标准书号 [S]. 北京:中国标准出版社,2015.

[6] 国家标准化工作委员会. GB 50017 - 2017 中国标准书号 [S]. 北京:中国标准出版社,2017.

[7] German Engineering Steel Structure Committee. DIN18800-T1Steel Structures Design and Construction [S]. Berlin: German Standards Committee,236-247,1990.

[8] German Engineering Steel Structure Committee. DIN18800-T2 Structural Steelwork Analysis of Safety Against Buckling of Linear Members and Frames [S]. Berlin: German Standards Committee,1990.

[9] American Society of Mechanical Engineers. ASMEA17. 1-2016 Safety Code for Elevators and Escalators [S]. New York: American Society of Mechanical Engineers,2016.

[10] 李 骏. 北京顺义西站自动扶梯桁架的抗震分析[J]. 中国电梯,2021,32(21):11-14.

[11] 王智超,陈 洋. 考虑地震情况的自动扶梯桁架设计[J]. 中国电梯,2020,13(21):21-22.

[12] 周绪红,周志彬,等. 交错桁架钢框架结构抗震设计方法研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2022,49(1):71-75.

[13] 刘冬梅. 浅析自动扶梯抗震专利技术发展路线[J]. 中国电梯,2020,31(11):57-59,63.

[14] KONO K, FUJITA S, ISHII A. Study on seismic response characteristics of escalator during huge earthquake[J]. **The Proceedings of the Dynamics & Design Conference**, 2018(1):216.

[15] LI X P, TANGY Y. Topology optimization of truss structures under non-stationary random seismic excitations with displacement and stress constraints [J]. **International Journal of Materials and Product Technology**, 2021, 61(2):131.

[16] 唐立波. 自动扶梯桁架的抗震计算与抗震设计的意义[J]. 中国电梯,2020,31(17):6-9.

[17] 杨天玲,朱道林. 基于 ANSYS 的自动扶梯桁架结构分析及实验研究[J]. 机电工程,2021,38(12):1641-1646.

[18] 成大先. 机械设计手册[M]. 5 版. 北京:化学工业出版社,2008.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

杨天玲,林 森,陈义东. 地震工况下自动扶梯桁架结构分析研究[J]. 机电工程,2022,39(12):1784 - 1788.

YANG Tian-ling, LIN Sen, CHEN Yi-dong. Analysis of escalator truss structure under seismic conditions[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2022, 39(12):1784 - 1788.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>